DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.005

细粒含量对粉土液化后低强度段变形的影响

曾长女[1],王新建[2]

(1.河南工业大学土木建筑学院,河南 郑州 450052;2.华北水利水电学院资源与环境学院,河南 郑州 450011)

摘要:应用多功能静动三轴仪进行细粒含量对粉土液化后变形试验,探讨细粒含量对粉土液化后低强度段变形的影响。研究表明,粉粒含量和黏粒含量对粉土液化后低强度段变形都有较大影响,不同黏粒含量对粉土液化后低强度段变形的影响在黏粒质量分数为 9%时最大,随着粉粒含量的增加,粉土液化后低强度段变形逐渐增加,定量影响主要体现在变形参数 C 上。提出了同时考虑黏粒含量和粉粒含量对粉土液化后低强度段变形影响的定量模式,试验结果表明该模式有很好的可靠性。

关键词:细粒含量;粉土液化变形;变形参数

中图分类号:TU411 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0016-03

Influence of fine particle content on post-liquefaction deformation behavior of silt in low-strength section//Zeng Chang-nü[1], Wang xin-jian[2] (1. *College of Civil Engineering and Architecture*, *Henan University of Technology*, *Zhengzhou* 450052; 2. *Faculty of Environmental Engineering*, *North China University of Water Conservancy and Electric Power*, *Zhengzhou* 450011, *China*)

Abstract: A universal triaxial torsional shear apparatus was used to perform tests to study the influence of fine particle content on post-liquefaction deformation behavior of silt. Test results show that both silt particle content and clay particle content greatly influence the post-liquefaction deformation behavior of silt in low-strength sections, with certain influences on the value of the deformation parameter C. The influence on strain of the low-strength section is greatest when the clay particle mass fraction equals 9%, and the strain of the low-strength section increases with the silt particle content. Furthermore, a new post-liquefaction deformation model taking the influences of both silt particle and clay particle content into account was proposed. Tests data verifie that the new model is highly reliable.

Key words: fine particle content; post-liquefaction deformation of silt; deformation parameter

尽管不同的土层当中都存在细粒土,然而几乎所有的地震液化试验都只研究均质土。单纯从黏粒含量定量地研究其对土的动力特性的影响,还是近 10 年来才开始。范淑菊[1]、衡朝阳[2]等分别做了细粒土液化方面的研究。

粉土是一种由特殊颗粒组成和具有特殊工程性质的土,过去人们往往认为其工程性质差而导致使用性能差。随着施工工艺的发展,粉土也能够经过处理而被使用。关于细粒含量对粉土液化后变形的影响的定量研究甚少,而粉土液化后低强度段的变形占液化后总变形比例的大部分,因而有必要研究细粒含量对粉土液化后低强度段变形的影响。本文通过试验研究和理论分析,提出了细粒含量对粉土液化后低强度段变形的定量影响模式。

1 试验仪器与试样制备

试验所用仪器为河海大学与日本圆井株式会社共同合作研制生产的全自动多功能静动三轴仪[3]。该仪器为非定型产品,与传统仪器相比,无论在试验精度还是在动力试验及复杂应力路径模拟方面都有其突出优点,对土壤液化后相关方面的研究有突出的优势[3]。

试验用土按不同细粒含量的要求进行配置。控制不同黏粒含量的试样,其干密度 ρ_d 为1.450 g/cm^3,砂粒质量分数保持 10%不变,黏粒质量分数 F_c 分别为 3%,6%,9%,12%,15%;控制不同粉粒含量的试样,其干密度 ρ_d 为 1.556 g/cm^3,黏粒质量分数保持 8%不变,粉粒质量分数 F_f 分别为 50%,60%,70%,80%。表 1 所示为原料土的粒径分布。

试验采用直径 61.8 mm、高度 140 mm 的试样。所有粉土样分 7 层捣实,根据土样的干密度及预先设计的含水率确定每层土样的质量,击实到相应高度,各层接触面刮毛,以保证上下层接触良好。试样

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划项目(2008A560002);郑州市科技攻关计划(074SGYS38252-1)

作者简介:曾长女(1978—),女,江西南丰人,讲师,博士,从事土动力学与地基基础教学及科研工作。E-mail:zengcnv@126.com

表 1　原料土的粒径分布　%

原料土类	细砂粒质量分数（0.25～0.075 mm）	粉粒质量分数（0.075～0.005 mm）	黏粒质量分数（＜0.005 mm）
细　砂	100	0	0
典型粉土	12	80	8
黏　土	2.92	76.74	20.34

制备完成后，采用抽真空和反压饱和的方法进行饱和，饱和后将试样装入三轴室进行固结，然后进行液化后试验。

2　不同细粒含量粉土液化后试验成果

在文献[4]的基础上，开展了不同黏粒含量和不同粉粒含量粉土液化后试验。试验采用等压固结的方式，动加载达到液化的标准为动应变达 5%。动加载后施加单调荷载模拟液化后变形，试验结果如图 1 及图 2 所示。

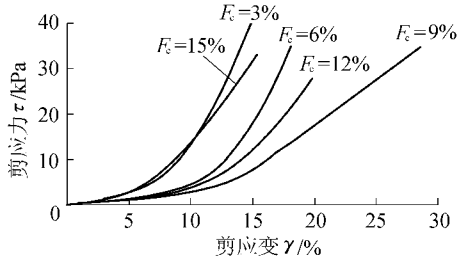

图 1　不同黏粒含量粉土动加载后静加载的应力-应变关系（$\rho_d = 1.450\ g/cm^3$，$\gamma_{max} = 20\%$）

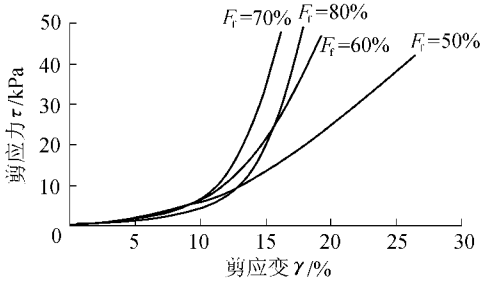

图 2　不同粉粒含量粉土动加载后静加载的应力-应变关系（$\rho_d = 1.556\ g/cm^3$，$\gamma_{max} = 30\%$）

由图 1、图 2 可见，不同黏粒含量和不同粉粒含量的粉土液化后变形曲线类似，低强度的应力很小而变形发展很快，但细粒含量对低强度段的影响情况不同。对于不同黏粒含量的粉土样，黏粒质量分数为 3% 和 15% 的粉土样试验结果曲线位于图 1 最内侧（左侧），向右依次为黏粒质量分数 6%，12%，9%，也即黏粒质量分数为 3% 和 15% 时的粉土液化后低强度段应变最小，黏粒质量分数为 9% 的粉土液化后低强度段应变最大。对于不同粉粒含量的粉土样，随着粉粒的增加液化后低强度段应变逐渐增加。可见，对于粉土这类特殊土，颗粒含量对液化后低强度段的应力-应变关系影响较大。图中 γ_{max} 为动加载最大双幅动剪应变，可采用 $\gamma_{max} = 1.5\varepsilon_{max}$ 关系式进行换算，其中 ε_{max} 为动加载过程最大双幅轴向动应变。

3　细粒含量对粉土液化后低强度段参数 C 的影响

由文献[4]可知，粉土液化后应力-应变关系为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_d \tag{1}$$

式中：ε_0 为液化后低强度段应变；ε_d 为低强度段后至试验结束的应变。

分析液化后低强度段应变得到如下关系：

$$\varepsilon_0 = C(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{ertry}) \tag{2}$$

式中：ε_{max} 为动加载下最大双幅轴向应变；ε_{entry} 为动加载门槛应变；C 为试验参数。

当同时考虑黏粒含量和粉粒含量变化对参数 C 的影响时，需保证试样是处于同一干密度条件。图 1 和图 2 试样中不同黏粒含量变化的粉土样干密度为 $1.450\ g/cm^3$，而不同粉粒含量变化的粉土样的干密度为 $1.556\ g/cm^3$，因此需要得到干密度相同时参数 C 与黏粒含量和粉粒含量的关系式。文献[5]表明，参数 C 随着干密度的增加呈单调增加趋势，因而可以简单地用差值法来统一成在相同干密度条件下的关系。

为研究方便，取所有不同黏粒含量所得参数 C 对黏粒质量分数为 8% 所得参数的比值，定义为 A，并将黏粒质量分数为 8% 的参数 C 定义为 C_{ref}。图 3 表示的点即 F_c 为 3%，6%，9%，12%，15% 的点。注意本文中粉粒质量分数为 80% 的点与黏粒质量分数为 8% 的点为同一种粉土样，因而粉粒质量分数为 80% 的试样对应的参数 C 即为 C_{ref}。这样可将不同粉粒含量土样对应的参数 C 值对粉粒质量分数为 80% 时的参数 C_{ref} 进行归一化，在图 3 中表示为拟合成直线的点。这里 A 值定义为 C/C_{ref}。

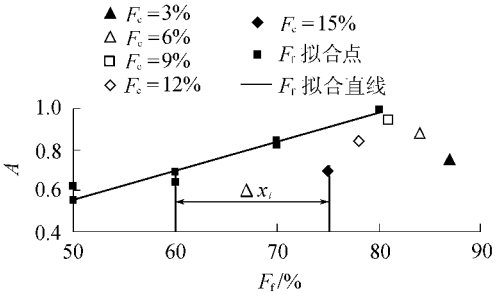

图 3　A 与 F_f 的关系

由图 3 得

$$A = a_1(F_f - \Delta x) + a_2 \tag{3}$$

式中：a_1，a_2 为拟合参数。对图 3 拟合直线以外的点进行分析，并定义 $B = \Delta x_i +$ 对应的黏粒含量，其中 Δx_i 表示不同黏粒含量对应点至图 3 拟合直线相交点之间的水平距离。作 B 与 $|F_c - 8|$ 的关系曲线，如图 4 所示。

表 2　试验值和计算值对比

$\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	$F_f/\%$	$F_c/\%$	Δx	C	$\varepsilon_{0,a}$	ε_{max}	ε_0 计算值	ε_0 试验值
1.382	80	8	1.5719	0.3176	2.6920	7.871	2.0158	1.8262
1.382	80	8	1.5719	0.3176	2.6920	14.128	4.0030	4.1477
1.382	80	8	1.5719	0.3176	2.6920	22.141	6.5480	6.8146
1.556	80	8	1.5719	0.2466	1.9619	21.22	4.7288	4.6322
1.556	50	8	1.5719	0.1379	1.9619	8.499	1.7549	1.6220
1.556	50	8	1.5719	0.1379	1.9619	11.485	2.1667	2.3675
1.556	60	8	1.5719	0.1741	1.9619	14.990	2.8307	2.6452
1.556	60	8	1.5719	0.1741	1.9619	17.678	3.2986	3.3595
1.556	60	8	1.5719	0.1741	1.9619	20.088	3.7182	3.8125
1.556	70	8	1.5719	0.2104	1.9619	14.156	2.8363	2.8148
1.556	70	8	1.5719	0.2104	1.9619	17.250	3.4873	3.4659
1.450	84	6	9.5427	0.2730	2.4066	8.949	2.1197	2.2326
1.450	84	6	9.5427	0.2730	2.4066	13.911	3.4743	3.5747
1.450	81	9	3.5573	0.2857	2.4066	9.422	2.2414	2.2035
1.450	81	9	3.5573	0.2857	2.4066	14.479	3.6863	3.7981
1.450	78	12	9.5135	0.2475	2.4066	15.725	3.8235	4.2655
1.450	78	12	9.5135	0.2475	2.4066	23.896	5.8459	6.0716
1.450	78	12	9.5134	0.2475	2.4066	31.070	7.6214	7.5792
1.450	75	15	15.4697	0.2094	2.4066	9.012	2.1997	2.3116
1.450	75	15	15.4697	0.2094	2.4066	19.923	4.4845	4.7169
1.450	75	15	15.4697	0.2094	2.4066	28.251	6.2284	6.9286

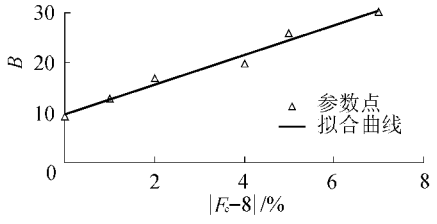

图 4　B 与 $\left|F_c-8\right|$ 的关系

由图 4 可得

$$B = \Delta x + F_c = 2.9854 \times \left|F_c - 8\right| + 9.5719 \quad (4)$$

从而可得

$$\Delta x = 2.9854 \times \left|F_c - 8\right| + 9.5719 - F_c \quad (5)$$

又由 $C = AC_{ref}$ 和式 $C = c_0(\rho_d + c_1)$[5] 得

$$C = a(F_f - \Delta x - b)(2.16 - \rho_d) \quad (6)$$

式中：a，b 为拟合参数。

本文试验中当 $\varepsilon_{max,a} = 10\%$ 时，$\varepsilon_{0,a}$ 与 ρ_d 保持很好的线性关系（见图 5）。$\varepsilon_{max,a} = 10\%$ 表示动加载最大双幅轴向动应变为 10%，$\varepsilon_{0,a}$ 表示最大双幅轴向应变为 10% 时粉土样产生的液化后低强度段应变。

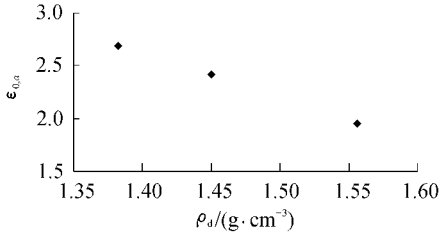

图 5　$\varepsilon_{0,a}$ 与 ρ_d 的关系（$\varepsilon_{max,a} = 10\%$）

4　试验结果验证

分别进行干密度、黏粒含量、粉粒含量影响下的粉土液化后应力-应变关系的试验值与计算值的对比验证。采用式 $\varepsilon_0 = C(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{max,a}) + \varepsilon_{0,a} + \varepsilon_{0,a}$，以及 $\varepsilon_{0,a} = -4.1959\rho_d + 8.4907$ 进行验证。由表 2 可知不同干密度、不同黏粒含量、不同粉粒含量影响下的粉土液化后低强度段的试验值与预测值之间的差异，结果表明试样液化后低强度段的应变试验值与预测值相差不大。

5　结　语

基于室内试验，本文综合考虑细粒含量变化对粉土液化后低强度段变形参数的影响，验证了影响参数的可靠性。当综合考虑干密度、黏粒含量、粉粒含量变化时，影响参数可表示为 $C = a(F_f - \Delta x - b)\cdot(2.16 - \rho_d)$，$\varepsilon_{0,a} = -4.1959\rho_d + 8.4907$，$\varepsilon_{max,a}$ 是常量。验证结果表明该表达式具有较好的适用性，但是对于粉土液化后的研究还需深入，以便进一步修正粉土液化后的变形表达式。

参考文献：

[1] 范淑菊. 夯后轻亚黏土抗液化性能的试验研究[D]. 太原：太原工业大学，1988.

[2] 衡朝阳，何满潮，裘以惠. 含黏粒砂土抗液化性能的试验研究[J]. 工程地质学报，2001，9(4)：339-344.

[3] 刘汉龙，周云东，高玉峰，等. 多功能静动三轴仪研制及在液化后大变形中的应用[J]. 大坝观测与土工测试，2001，25(5)：48-51.

[4] 刘汉龙，曾长女，周云东. 粉土液化后变形试验研究[J]. 岩土力学，2007，28(9)：1866-1870.

[5] 曾长女. 细粒含量对粉土液化及液化后影响的试验研究[D]. 南京：河海大学，2006.

（收稿日期：2007-09-07　编辑：高建群）